

Reconfiguración Óptima de Redes de Distribución Empleando un Algoritmo Metaheurístico Híbrido: una Combinación entre los Algoritmos Genéticos y las Hormigas León

Jhon Jeiver Arias Posso

Trabajo de grado presentado como requisito
parcial para optar al título de
Ingeniero Electricista

Director

M.Sc. Oscar Danilo Montoya

Co-Director

Ph.D. Alejandro Garcés Ruiz

Pereira, 15 de junio de 2018
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
Programa de Ingeniería Eléctrica



Nota de Aceptación

M.Sc. Oscar Danilo Montoya. Director

Ph.D. Alejandro Garcés Ruiz. Co-Director

Jurado

Pereira, 15 de junio de 2018

Reconfiguración Óptima de Redes de Distribución Empleando un Algoritmo Metaheurístico
Híbrido: una Combinación entre los Algoritmos Genéticos y las Hormigas León
©Jhon Jeiver Arias Posso

Pereira, 15 de junio de 2018
Programa de Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Pereira
Carrera 27 No 10-02 Barrio Alamos - Risaralda - Colombia
TEL: (+57)(6)3137122
www.utp.edu.co
Versión web disponible en: *<http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/tesisd/index.html>*

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado principalmente a mis padres Adriana y Jairo, que durante estos años me han acompañado y brindado todo su apoyo. Este logro más que personal, es un sueño cumplido para ellos, el cual es ver a su hijo profesional, así que más que una meta alcanzada es un triunfo para ellos.

A mi hermanito Juan José que es la vida de la casa y que este logro sea un ejemplo para él a futuro.

A mi familia que es una parte importante ya que siempre me expresaron sus buenos deseos en este proceso.

Agradecimientos

Quiero agradecerle a mi familia y principalmente a mis padres que son el principal apoyo que he tenido durante mi vida y gracias a Dios los tengo con vida, acompañándome en este gran logro. De igual forma a esas personas que me apoyaron durante este proceso y que de una u otra manera estuvieron presentes, a ellos les quiero agradecer por sus buenos deseos.

A Oscar Danilo Montoya director de este proyecto, por su ánimo, paciencia y gran colaboración, que aún con proyectos personales, dedicó parte de su tiempo para realizar este trabajo de grado. A los profesores que hicieron parte de mi formación desde el inicio y durante estos años de esta gran etapa.

Resumen

En este documento se presenta una metodología para la reconfiguración de sistemas de distribución de energía eléctrica, donde se plantea un modelo matemático de optimización mono-objetivo que se resuelve mediante un algoritmo de optimización metaheurística en combinación con la solución de las ecuaciones de flujo de carga resultantes. La función objetivo corresponde a la minimización de las pérdidas de potencia activa en los conductores de la red, y considerando las características operativas clásicas de sistemas de distribución y que corresponden al balance de potencia en cada nodo y una configuración operativa radial.

Como técnica de optimización metaheurística, se emplea una combinación entre la técnica metaheurística de optimización hormigas león y los algoritmos genéticos, ya que han mostrado gran eficiencia en problemas similares como el caso de la localización y dimensionamiento óptimo de generación distribuida y programación de mantenimientos en centrales de generación de energía, entre otros.

Con la implementación de este algoritmo híbrido de optimización, se espera alcanzar los resultados reportados en la literatura especializada para el problema de reconfiguración óptima de alimentadores primarios de distribución energía. Para esto se emplean tres sistemas de prueba de 16, 69 y 70 nodos, respectivamente.

Índice general

Resumen	V
Índice general	VII
Índice de tablas	VIII
Índice de figuras	IX
1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	2
1.2. Justificación	3
1.3. Objetivos	4
1.3.1. Objetivo general	4
1.3.2. Objetivos específicos	4
1.4. Estado del arte	4
1.5. Organización del documento	6
2. Descripción y formulación matemática	7
2.1. Descripción del problema	7
2.2. Formulación Matemática	8
3. Metodología de la solución	10
3.1. Generalidades de los algoritmos genéticos	10
3.2. Algoritmo de optimización hormigas león	10
3.3. Operadores Genéticos	11
3.4. Diagrama de flujo del ALO clásico	12
3.5. Configuraciones Factibles	12
3.6. Aplicación de la metodología propuesta	13

4. Metodología Propuesta	14
4.1. Adaptación de la técnica de solución	14
4.2. Conceptos a tener en cuenta	15
4.2.1. Codificación	15
4.2.2. Radialidad	15
4.3. Ejemplo de implementación	15
4.4. Análisis de resultados	17
5. Aplicación y resultados	19
5.1. Sistema de prueba I	19
5.1.1. Análisis de resultados	20
5.2. Sistema de prueba II	21
5.2.1. Análisis de resultados	23
6. Conclusiones y recomendaciones	25
6.1. Conclusiones	25
6.2. Recomendaciones	26
A. Datos del Sistema de Prueba I	27
B. Datos del Sistema de Prueba II	30
Bibliografía	35

Índice de tablas

4.1. Información de carga en los nodos - Sistema de 16 nodos	16
4.2. Información de las líneas - Sistema de 16 nodos	17
4.3. Parámetros del algoritmo de optimización	17
4.4. Resultados obtenidos para el sistema de 16 barras	18
5.1. Parámetros del algoritmo de optimización propuesto	20
5.2. Resultados - Sistema 69 nodos	20
5.3. Resultados - Sistema 70 nodos	23
A.1. Información de las líneas y cargas del sistema de prueba I	27
B.1. Información de las líneas y cargas del sistema de prueba II	30

Índice de figuras

3.1.	Diagrama de flujo de la metodología de solución	12
3.2.	Diagrama de flujo de la metodología propuesta	13
4.1.	Topología inicial - Sistema de 16 nodos	16
4.2.	Topología final - Sistema de 16 nodos	18
5.1.	Configuración inicial - Sistema de 69 nodos	20
5.2.	Topología final - Sistema de 69 nodos	21
5.3.	Topología inicial - Sistema de 70 nodos	22
5.4.	Topología final - Sistema de 70 nodos	24

Capítulo 1

Introducción

Un sistema eléctrico de potencia incluye las etapas de generación, transmisión, distribución y utilización de la energía eléctrica, y su función primordial es la de llevar esta energía desde los centros de generación hasta los centros de consumo y por último entregarla al usuario en forma segura y con los niveles de calidad exigidos en las normativas vigentes. Aproximadamente las 2/3 partes de la inversión total del sistema de potencia, están dedicados a la parte de distribución, lo que implica necesariamente un trabajo cuidadoso desde la planeación, diseño, construcción y operación de este sistema, lo que requiere manejar una información voluminosa y tomar numerosas decisiones, siendo esta una tarea compleja pero de gran importancia para el bienestar de la sociedad [1].

La reconfiguración de sistemas de distribución de energía eléctrica consiste en alterar la configuración de las redes eléctricas a través de la apertura o cierre de interruptores. Normalmente, este procedimiento se hace para aislar fallas, minimizar pérdidas de energía, balancear carga entre alimentadores o para mejorar los niveles de tensión, entre otros. El problema de reconfiguración se puede considerar como un problema de programación no lineal entero mixto, que presenta el fenómeno de explosión combinatorial a medida que el tamaño del sistema de distribución bajo análisis aumenta [2].

En la actualidad, las empresas de distribución se ven obligadas a aumentar sus ganancias para garantizar su supervivencia dentro de un entorno competitivo y alcanzar los objetivos de confiabilidad establecidos por las agencias reguladoras. El interés en la reconfiguración de la red se debe al hecho de que la apertura y cierre de los dispositivos de conmutación no resulta en costos adicionales para los servicios de distribución. En este contexto, la reconfiguración de distribución de red puede convertirse en una alternativa atractiva para mejorar las características operativas de los sistemas de distribución eléctrica [3].

Las pérdidas técnicas tienen un gran impacto sobre las tarifas de distribución de electricidad, es por esto que, la función objetivo a ser minimizada en este trabajo corresponde a las pérdidas totales de potencia activa del sistema. Ante el rápido desarrollo de la automatización de los sistemas de distribución, las pérdidas están desempeñando un papel importante en la planificación operacional de estos sistemas por parte de los operadores de red [4].

La minimización de pérdidas eléctricas, la mejora de los perfiles de voltaje y el equilibrio de cargas en alimentadores, se han logrado mediante el uso de metodologías como algoritmos genéticos y búsqueda tabú [3]. Como una alternativa a la solución mediante la metodología de algoritmos genéticos se empleará una combinación entre un algoritmo genético y la técnica de optimización hormigas león (ALO, por sus siglas en inglés), que es una de las técnicas de optimización recientemente inspirada en el proceso que imita la de caza de las hormigas en trampas con forma de hormiguero. Adicionalmente, el ALO equilibra la exploración y la explotación con un solo operador que puede buscar de manera adaptativa el dominio de las soluciones para la solución óptima [5].

La técnica ALO es comparable con una variedad de algoritmos en la literatura. Los resultados de las funciones de prueba demuestran que el algoritmo propuesto es capaz de proporcionar resultados muy competitivos en términos de exploración mejorada, evitando el óptimo local, explotación y convergencia. El algoritmo ALO también encuentra diseños óptimos superiores para la mayoría de los problemas clásicos de la ingeniería, lo que demuestra su aplicabilidad y versatilidad [6].

1.1. Planteamiento del problema

Los sistemas de distribución (SD) tienen como función suministrar energía desde la subestación de distribución hasta los usuarios finales, compuesto básicamente por elementos como transformadores, interruptores, seccionadores, etc., cuya función es reducir los niveles de alta tensión de las líneas de transmisión, cuenta también con circuitos primarios y circuitos secundarios.

El SD es considerado como la parte más importante y con mayor diversidad de elementos los cuales controlar y seleccionar de la mejor manera para evitar pérdidas, suministrar con mayor calidad y confiabilidad la distribución de energía, en cuanto un SD se encuentre operando de manera correcta, este garantizará eficiencia y calidad y el servicio de energía. En la actualidad la operación del sistema eléctrico colombiano se encuentra estandarizado y reglamentado bajo unas normas reguladas que se encargan

de generar una confiabilidad en el sistema [1].

La reconfiguración del sistema de distribución permite que pueda optimizar el funcionamiento de la red y generar mayores índices de confiabilidad. Para esto se debe tener acceso a la creación de nuevas estructuras para poder interconectar la red desde varios esquemas, ya que la intención es alterar las conexiones topológicas de las redes [2].

Como finalidad en esta investigación se busca solucionar el problema de reconfiguración óptima de SD a través de la implementación de una metodología que consiste en un algoritmo híbrido entre un algoritmo genético y la optimización con hormigas león [5]. Se escoge esta estrategia de solución ya que ha sido propuesta recientemente en la literatura especializada y ha presentado excelentes resultados en problemas de optimización similares al estudiado en este trabajo, como lo es la ubicación y el dimensionamiento óptimo de generadores distribuidos [7] y la coordinación óptima de mantenimientos preventivos en sistemas de generación hidrotérmica [8].

1.2. Justificación

En un sistema de distribución la operación debe ser bien ejecutada de lo contrario se puede ocasionar problemas en el funcionamiento de la red como: no cumplir criterios y restricciones técnicas y económicas, exceder límites operativos, dejar sin suministro del servicio de energía a los consumidores, sobrecostos de operación y penalizaciones de los entes reguladores, entre otros [1].

El tema de reconfiguración de sistemas de distribución ha sido estudiado en las últimas décadas a través de distintos enfoques. Se han utilizado técnicas heurísticas, algoritmos genéticos, lógica difusa y redes neuronales artificiales, entre otros [2]. Las pérdidas están desempeñando un papel importante en el plano operacional de los sistemas de distribución ya que esto puede incurrir en generar gran impacto sobre las tarifas de los consumidores, por esto, la función objetivo corresponde a la minimización de las pérdidas totales de energía del sistema [4]; considerando que ante la operación inadecuada (ineficiente) de las redes de distribución, los entes reguladores pueden penalizar a dichos operadores.

Para resolver el problema de reconfiguración óptima de redes primarias de distribución, en este trabajo se propone una combinación entre los algoritmos genéticos y las hormigas león para minimizar las pérdidas de potencia en la componente resistiva de las líneas, lo que no se ha evidenciado en la revisión de la literatura y se presenta como una oportunidad de investigación, la cual será explorada con el desarrollo de este trabajo de grado.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Desarrollar una metodología híbrida entre los algoritmos genéticos y las hormigas león para la reconfiguración óptima de redes primarias de distribución.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Revisar la bibliografía con el fin de comprender el tema a desarrollar.
2. Estudiar las técnicas de optimización metaheurística hormigas león y los algoritmos genéticos.
3. Definir el modelo matemático del problema de reconfiguración óptima de redes primarias distribución.
4. Implementar la técnica de optimización en MATLAB.
5. Simular diferentes sistemas de prueba disponibles en la literatura especializada.
6. Realizar el análisis de los resultados obtenidos.
7. Redactar el documento final.

1.4. Estado del arte

En la literatura especializada se encuentran múltiples trabajos asociados con la reconfiguración óptima de sistemas de distribución, entre los cuales se destacan los siguientes:

Coelho A. *et al.* en 2004 [3] presentan una método de reconfiguración en red de distribución con el fin de minimizar las pérdidas eléctricas, teniendo en cuenta las limitaciones asociadas con sobrecargas, caídas de tensión y violación de algunos indicadores de confiabilidad. La metodología propuesta se basa en el algoritmo de recocido simulado y permite la generación de soluciones candidatas sin violar la restricción de topología radial.

Thakur T. *et al.* en 2006 [9] describen un estudio de reconfiguración de la red de distribución. El análisis de las diversas características de la red de distribución radial

puede ayudar a estudiar en un área particular la investigación del sistema de distribución de energía.

Carcamo A. *et al.* en 2007 [10] desarrollan un algoritmo que permite reconfigurar un sistema de distribución minimizando la energía que no es suministrada. La red se modela utilizando teoría de grafos, mientras que la energía no suministrada se formula recursivamente y se parametriza en términos de los índices de confiabilidad del sistema.

A. M. G. Cabezas. *et al.* en 2008 [4] desarrollan nuevas formulaciones cuadráticas para el problema, se muestra que todas las formulaciones conducen a problemas convexos, lo que garantiza que el mínimo global es único y por lo tanto permite una aplicación eficiente del método estándar de Newton. El documento también presenta una nueva búsqueda de enteros basada en el bien conocido método de ramificación y encuadernación.

Carvajal S. *et al.* en 2009 [2] se propone un algoritmo de optimización basado en colonia de hormigas, aplicado al problema de reconfiguración de redes de distribución con topología radial, este es modelado como un problema de programación no lineal entero mixto cuya función objetivo es la minimización de pérdidas técnicas del sistema de distribución.

Zhang P. *et al.* en 2010 [11] proponen un método para mejorar la fiabilidad de la red y reducir las pérdidas por medio de reconfiguración. El método propuesto maneja las incertidumbres de los datos de entrada y de maximizar las posibilidades de mejora del rendimiento, especialmente cuando la información estadística o datos medidos no están disponibles o son insuficientes.

Rugthaicharoencheep N. *et al.* en 2010 [12] presentan un enfoque para encontrar la implementación óptima de la reconfiguración de alimentación en sistemas de distribución de carga desequilibrada con el objetivo de minimizar las pérdidas de potencia. El problema de optimización está sujeto a restricciones del sistema en cuanto a límites de tensión de carga, radialidad, no cortar suministro de carga y límites de capacidad. Las pérdidas de potencia del sistema y las tensiones del bus se resuelven mediante un algoritmo de flujo de potencia trifásico. La técnica de solución, desarrollada sobre la base de la búsqueda Tabu, se emplea para buscar estados de conmutación para la reconfiguración del alimentador bajo diferentes condiciones de carga desequilibradas.

Jazebi S. *et al.* en 2012 [13] describen especialmente la capacidad de la reconfiguración de la red para mejorar los problemas de calidad de energía para mitigar las pérdidas de potencia. Esto incurre en un problema de optimización combinatoria, en el que el mejor estado de conmutación podría determinarse a través de técnicas de optimización heurística. Por lo tanto algoritmo de evolución diferencial (DEA) ha sido implementado

para resolver el problema de optimización no lineal.

Bayat A. *et al.* en 2013 [14] presentan un método heurístico denominado algoritmo constructivo basado en la distribución de voltaje uniforme (UVDA), especialmente diseñado para la reconfiguración óptima de redes de distribución a gran escala. El algoritmo comienza con la expansión de una subred a través del seguimiento del voltaje máximo del bus y la realización de una serie de operaciones de intercambio de ramas simultáneamente.

Lakshmireddy Y. *et al.* en 2014 [15] proponen un algoritmo de heurística Bioinspirado para resolver el problema de reconfiguración de red de distribución de energía para la minimización de pérdidas. El método propuesto se basa en el comportamiento social de los insectos luciérnagas. Durante el proceso de optimización, se deben tener en cuenta varias restricciones para la reconfiguración de la red. La función objetivo es mejorar el voltaje de cada bus y reducir las pérdidas de potencia.

Naveen S. *et al.* en 2015 [16] formulan como un problema de optimización objetivo no lineal, la solución propuesta se estima como un problema de optimización combinatoria no lineal y el estado de los conmutadores no es diferenciable que se resuelve utilizando el algoritmo de forrajeo bacteriano modificado, el algoritmo se modifica para una mejor convergencia. Este algoritmo modificado se describe en un contexto general y luego se aplica específicamente al problema de reconfiguración de red.

Nótese, que en la revisión anterior, no se encuentra evidencia de que las hormigas león como técnica de optimización combinada con los algoritmos genéticos hayan sido aplicados al problema de reconfiguración óptima de sistemas de distribución, lo cual sin duda emerge como una oportunidad de investigación para este proyecto de grado.

1.5. Organización del documento

Este documento se estructura de la siguiente manera: en el capítulo 2 se describe la formulación del problema y su respectivo modelo matemático con las restricciones. El capítulo 3 se presenta la metodología de la técnica propuesta para resolver el problema de reconfiguración de sistemas de distribución. En el capítulo 4 se presenta la técnica propuesta empleada en un problema de aplicación que se encuentra en la literatura. Por otro lado, en el capítulo 5 se realiza la aplicación de la metodología propuesta en dos sistemas de prueba de la literatura especializada. En el capítulo 6 se encuentran las conclusiones y posibles propuestas para trabajos futuros. Finalmente, se encuentran las referencias bibliográficas y los apéndices con información de los sistemas de prueba y los códigos implementados.

Capítulo 2

Descripción y formulación matemática

En este capítulo se presenta la descripción general del problema y la formulación matemática empleada para la reconfiguración óptima de sistemas de distribución.

2.1. Descripción del problema

La reconfiguración de redes de distribución como ya se mencionó consiste en modificar la conexión en la topología ya establecida, mediante la apertura o cierre de interruptores, buscando optimizar su funcionamiento, es decir, obtener una nueva topología que presente el menor valor de pérdidas y que cumpla las restricciones que debe tener un sistema de distribución tales como: radialidad, niveles de tensión, cargabilidad, entre otros.

El problema de reconfiguración de la red es un problema combinatorial no lineal complejo debido al estado no diferencial de los interruptores y también los interruptores normalmente abiertos, determinados para satisfacer los requisitos del sistema [9]. Dicho problema se formula considerando como función objetivo, la minimización de las pérdidas de energía en la resistencia de los conductores; teniendo en cuenta restricciones clásicas de operación de sistemas de distribución [17]. El modelo matemático se presenta en la siguiente sección.

2.2. Formulación Matemática

El modelo matemático que describe el problema de reconfiguración y restricciones ha sido tomado de [18]:

La función objetivo (2.1) representa las pérdidas de potencia activa en la operación del sistema de distribución, la cual está en función de las magnitudes de los voltajes, θ_{ij} la diferencia de ángulo de fase entre nodos i y j ; la conductancia del tramo de red ij y la variable de decisión x_{ij} ; además Ω_R indica el conjunto de las ramas que componen el sistema.

$$\text{mín } z = \sum_{(ij) \in \Omega_R} (g_{ij} x_{ij} (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij})) \quad (2.1)$$

donde z representa la función objetivo a minimizar, asociada a las pérdidas de potencia activa en los tramos de la red.

Las ecuaciones (2.2) y (2.3) corresponden a las restricciones de balance de potencia activa y reactiva en cada uno de los nodos.

$$P_{Gi} - P_{Di} = \sum_{j \in \Omega_N} x_{ij} (V_i^2 g_{ij} - V_i V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij})) \quad \{\forall i \in \Omega_N\} \quad (2.2)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} = \sum_{j \in \Omega_N} x_{ij} (-V_i^2 b_{ij} - V_i V_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij})) \quad \{\forall i \in \Omega_N\} \quad (2.3)$$

donde P_{Gi} es la potencia activa generada en el nodo i , P_{Di} corresponde a la potencia activa demandada en el nodo i . De manera análoga, se representa la potencia reactiva en generada y demanda, b_{ij} la susceptancia del tramo de red de i a j .

Para tener en cuenta la calidad tanto del servicio como la del sistema, se determinan las condiciones máximas y mínimas de tensión y para la corriente la máxima condición en cada nodo, como se muestra en (2.4) y (2.5) respectivamente.

$$V_i^{\text{mín}} \leq V_i \leq V_i^{\text{máx}} \quad \{\forall i \in \Omega_N\} \quad (2.4)$$

$$I_{ij} \leq I_{ij}^{\text{máx}} \quad \{\forall i \in \Omega_{ij}\} \quad (2.5)$$

donde $V_i^{\text{mín}}$ es el limite inferior de tensión permitida en el nodo i y $V_i^{\text{máx}}$ el limite superior permitido de tensión en el nodo i , $I_{ij}^{\text{máx}}$ representa el máximo valor de corriente permitida en el tramo ij mientras que I_{ij} es la corriente de dicho tramo.

La ecuación (2.6) hace referencia a la restricción de radialidad.

$$\sum_{ij \in \Omega_{ij}} x_{ij} = |\Omega_N| - N_S \quad \{\forall ij \in \Omega_{ij}\} \quad (2.6)$$

donde $|\Omega_N|$ representa el conjunto de todos los nodos del sistema, N_S indica el número de subestaciones del sistema y Ω_{ij} representa el conjunto de tramos de red que componen el sistema.

Capítulo 3

Metodología de la solución

A continuación se describe la metodología propuesta a implementar sobre el problema de optimización en sistemas de distribución de energía, la cual emplea un algoritmo híbrido entre las hormigas león y los algoritmos genéticos.

3.1. Generalidades de los algoritmos genéticos

Los algoritmos genéticos son matemáticamente considerados como una técnica de optimización combinatorial, que han demostrado una alta probabilidad de concluir en soluciones de gran calidad tanto para problemas complejos y a su vez extensos, el AG fue desarrollado por Holland [19] y se fundamenta en el proceso de selección natural que se presenta en la naturaleza, en el cual los individuos mejor adaptados tienen una mayor posibilidad de sobrevivir y transmitir su código genético a su descendencia y así ir evolucionando de positivamente.

Las características generales de los algoritmos genéticos clásicos, pueden ser consultadas en [20].

3.2. Algoritmo de optimización hormigas león

Los algoritmos metaheurísticos se han utilizado como técnicas primarias para obtener las soluciones óptimas de los problemas reales de optimización del diseño de ingeniería, la optimización por hormigas león como su nombre lo indica, se enfoca en el comportamiento inteligente de las hormigas león en la captura de presas dentro de los hormigueros [6]. Las características principales del ALO se presentan como sigue:

El ALO trabaja inicialmente sobre un conjunto de soluciones finitas y factibles (en términos de la configuración radial), esta población inicial de tamaño $2N$ se denomina población de hormigas “padres” creada en forma aleatoria empleando un algoritmo heurístico de inicialización. A partir de esta población inicial se subdividen en poblaciones de tamaño de N , ahora empleando operadores genéticos, con estos conjuntos formados se crea un nuevo conjunto de soluciones factibles, con este último y reagrupando a una de las poblaciones de tamaño N , se clasifican en un grupo élite. Con lo cual el proceso de optimización se repite iterativamente, hasta encontrarla solución óptima del problema de reconfiguración en sistemas de distribución.

3.3. Operadores Genéticos

En 1975 la publicación Holland [19] presenta a los algoritmos genéticos como una abstracción de la evolución biológica, en el cual lo define como un método de cambio de una población de cromosomas a una nueva población, usando un tipo de “selección natural” junto con los operadores genéticos (recombinación, mutación) [20]. Estos se definen a continuación:

Población inicial: Se crean soluciones aleatorias controladas, que se interpretan como cromosomas. Por ejemplo: 10011, 00110, etc.

Selección: Este operador selecciona cromosomas en la población para la reproducción. Cuanto mejor sea la condición del cromosoma, mayor número de veces será seleccionado para reproducirse.

Recombinación o cruce: Este operador elige aleatoriamente un lugar dentro del cromosoma e intercambia las sub partes antes y después, entre dos cromosomas para crear dos descendientes. Por ejemplo, las cadenas 10000 y 11111 podrían ser cruzados después del tercer lugar en cada uno para producir las dos descendencias 10011 y 11100.

Mutación: Este operador arroja aleatoriamente algunos de los bits en un cromosoma. Por ejemplo, la cadena 00001 podría mutar en su segunda posición para producir 01001. La mutación puede ocurrir en cada posición de bit en una cadena con alguna probabilidad. Para efectos prácticos se debe permitir una probabilidad de mutación alta, para permitir la evolución de la población élite de soluciones.

3.4. Diagrama de flujo del ALO clásico

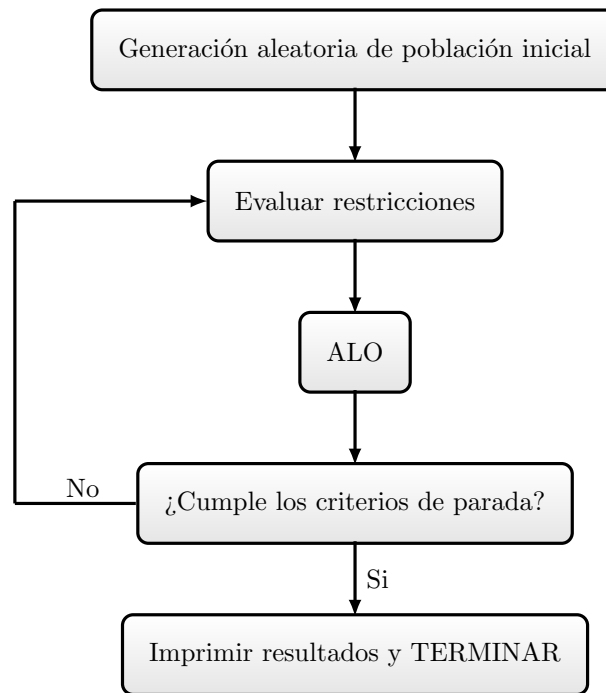


Figura 3.1: Diagrama de flujo de la metodología de solución

3.5. Configuraciones Factibles

El problema de reconfiguración de sistemas de distribución, es un problema con una infactibilidad superior al 95 % cuando se emplean estrategias evolutivas de optimización como el algoritmo genético en su solución [20]. Lo anterior es debido a la condición de radialidad impuesta en la operación de la red, razón por la cual, para minimizar los tiempos de computo en la solución del problema y evitar caer en espacios de soluciones infactibles, se inicia a partir de una configuración inicial factible.

Para lograr esto, se emplea un barrido iterativo que se aplica a redes de distribución, en la que cada configuración generada garantiza que:

1. No existe ninguna trayectoria cerrada entre nodos.
2. Solo existe un camino entre cada nodo y su subestación correspondiente.

3. No existe camino alguno entre pares de subestaciones.

3.6. Aplicación de la metodología propuesta

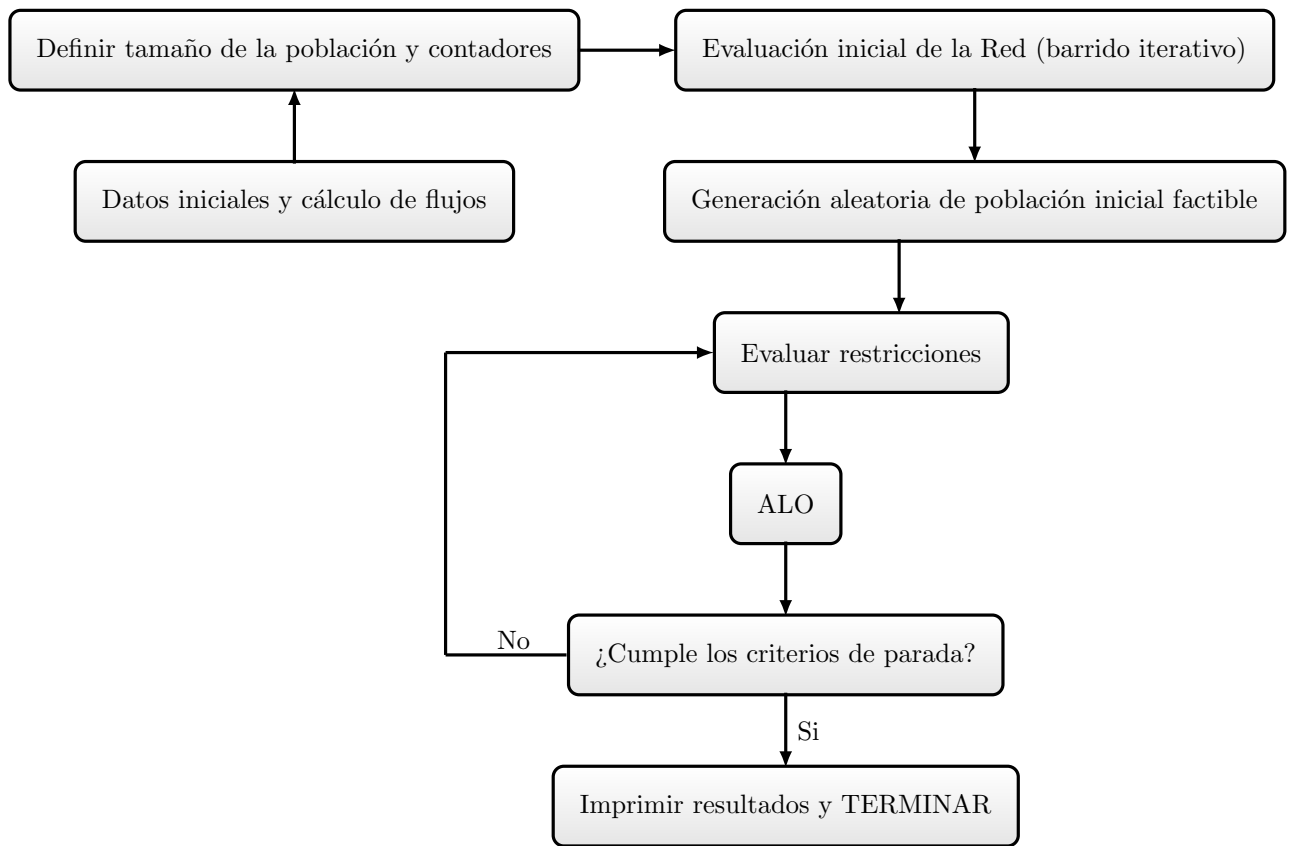


Figura 3.2: Diagrama de flujo de la metodología propuesta

Capítulo 4

Metodología Propuesta

En este capítulo se describe la metodología propuesta para solucionar el problema de reconfiguración de sistemas de distribución de energía eléctrica, la cual emplea como metodología de solución el algoritmo híbrido propuesto.

4.1. Adaptación de la técnica de solución

En esta sección se describe de manera generalizada los conceptos a tener en cuenta, para la solución del problema.

- **I:** Características más representativas del circuito:
 - Diagrama unifilar.
 - Posibles conexiones entre nodos.
- **II:** Obtener información de todo el sistema.
- **III:** Emplear modelo matemático mencionado en la sección 2.2 del capítulo 2.
- **IV:** Aplicar la metodología de solución al modelo matemático.
- **V:** Análisis de resultados.

4.2. Conceptos a tener en cuenta

4.2.1. Codificación

La codificación para la reconfiguración de sistemas de distribución toma un vector binario con la información de las líneas, que representa la posible configuración del sistema. Las líneas pueden o no estar presentes en la configuración, por lo tanto el vector se construye con la codificación binaria siendo uno “1”, en el caso que la línea exista y cero “0”, en caso contrario. El tamaño del vector será igual al número de líneas existentes en el sistema, más las posibles conexiones para la reconfiguración.

4.2.2. Radialidad

Al realizar la codificación para el sistema de distribución solo es posible si se cuenta con individuos factibles desde el punto de vista topológico, es decir, se debe conservar el tamaño en la topología de la red. Este trabajo busca prevenir la existencia de trayectorias cerradas (mallas), además, si el sistema posee más de una subestación ninguna de estas quedaría desconectada, es decir, cada una de ellas tendría un valor de carga agregado y para cada una de las mismas se cumple el criterio de radialidad sabiendo que $\sum_{ij \in \Omega_L} x_{ij} = |\Omega_N| - N_S$.

4.3. Ejemplo de implementación

Se realizará la solución práctica de un ejemplo en el cual podemos aplicar la técnica de solución. Para este caso se utiliza un sistema de prueba de 16 nodos y tres alimentadores principales, el cual es un sistema típico para realizar pruebas de reconfiguración en la literatura especializada [21].

El sistema de la Figura 4.1, representa el ejemplo a implementar, en este sistema existe posibilidad de interconexión entre los nodos 5 – 11, 7 – 16, 10 – 14. Además, los cuadrados representan las subestaciones del sistema. Nótese que todas las líneas son candidatas a abrirse.

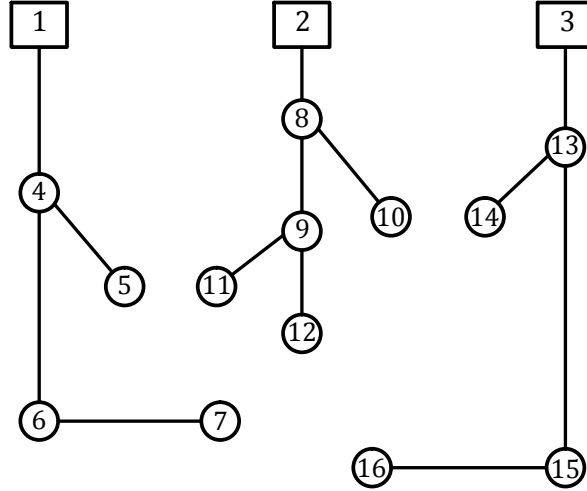


Figura 4.1: Topología inicial - Sistema de 16 nodos

Las Tablas 4.1 y 4.2, proporcionan la información de las líneas y las cargas respectivamente.

Envío	Recibo	R[Ω]	X[Ω]	Longitud [km]	Configuración Inicial	Costo de Operación[USD\$]	Capacidad de Corriente [A]	Tipo de Conductor
1	4	0,3967	0,5290	0,80	1	100	869,57	6
4	5	0,4232	0,5819	0,70	1	100	434,78	5
4	6	0,4761	0,9522	1,26	1	100	434,78	5
6	7	0,2116	0,2116	0,98	1	100	434,78	5
2	8	0,5819	0,5819	0,40	1	100	869,57	6
8	9	0,4232	0,5819	0,61	1	100	521,74	6
8	10	0,5819	0,5819	0,73	1	100	434,78	5
9	11	0,5819	0,5819	0,57	1	100	434,78	5
9	12	0,4232	0,5819	0,56	1	100	434,78	5
3	13	0,5819	0,5819	0,55	1	100	434,78	5
13	14	0,4761	0,6348	0,59	1	100	434,78	5
13	15	0,4232	0,5819	1,76	1	100	434,78	5
15	16	0,2116	0,2116	1,07	1	100	434,78	5
5	11	0,2116	0,2116	0,50	0	33500	434,78	5
10	14	0,2116	0,2116	0,50	0	33500	434,78	5
7	16	0,4761	0,6348	0,89	0	59630	434,78	5

Tabla 4.1: Información de carga en los nodos - Sistema de 16 nodos

Se emplea el modelo matemático de la sección 2.2 del capítulo 2. Se realiza la aplicación de la técnica de solución ALOA, utilizando los parámetros de la Tabla 4.3.

Nodos	P [kW]	Q [kVAr]
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	2000	1600
5	3000	400
6	2000	-400
7	1500	1200
8	4000	2700
9	5000	1800
10	1000	900
11	600	-400
12	4500	-1700
13	1000	900
14	1000	-1100
15	1000	900
16	2100	-800

Tabla 4.2: Información de las líneas - Sistema de 16 nodos

Parámetro	Valor
Número de individuos	10
Tasa de mutación	0.8
Tasa de cruce	0.9
Puntos de cruce	1
Generaciones	100

Tabla 4.3: Parámetros del algoritmo de optimización

4.4. Análisis de resultados

Comparamos la solución arrojada en pérdidas, ya que es el factor importante para los operadores de red, en el cual la disminución de las pérdidas de potencia activa, refleja una disminución en los costos operación por las pérdidas. Después de implementar el ejemplo se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 4.4, en la cual se relaciona las pérdidas en potencia activa y los tramos del sistema que no tuvieron conexión.

Solución	Ramas desconectadas	Pérdidas de potencia [kW]
1 (Inicial)	[5-11], [10-14], [7-16]	512.16
2 (Final)	[8-10], [9-11], [7-16]	466.46

Tabla 4.4: Resultados obtenidos para el sistema de 16 barras

La solución dos es mejor que la uno, se puede notar en la disminución de las pérdidas de hasta un 9.7971 %.

Al comparar la solución arrojada por la técnica de solución de este trabajo, con la mejor solución encontrada en la literatura (466.13 kW [2]) observamos que se reducen en un 0.0707 %, lo cual nos indica que este trabajo arroja un buen resultado para la disminución de pérdidas. La Figura 4.2, nos muestra la configuración final de sistema de distribución.

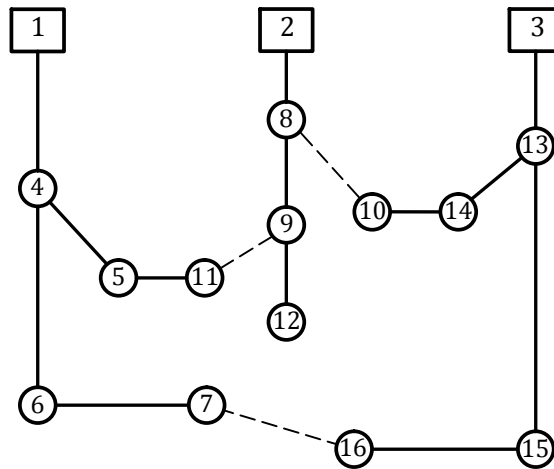


Figura 4.2: Topología final - Sistema de 16 nodos

Capítulo 5

Aplicación y resultados

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos a través de la implementación computacional de la metodología propuesta en el capítulo 4. Esta es aplicada a dos sistemas de prueba de la literatura especializada para verificar su validez, aplicabilidad y competitividad ante diferentes condiciones topológicas de los sistemas de distribución.

Las simulaciones se realizaron en un computador *Intel Core i7* con *6GB* de *RAM* y un sistema operativo *Windows 10 professional* empleando el software *MATLAB*, el cual cuenta con licencia institucional de la **Universidad Tecnológica de Pereira**.

5.1. Sistema de prueba I

Este es un sistema de prueba de 69 nodos [22], el cual se presenta en la Figura 5.1. Este sistema de distribución contiene cinco posibles conexiones para realizar la reconfiguración que se representan con las líneas discontinuas. El cuadrado corresponde a la subestación, mientras que los puntos son nodos.

Los parámetros del sistema se presenta en la Tabla A.1 del apéndice A, las cuales contienen la información de las líneas y cargas en los nodos, respectivamente.

Para la aplicación de la técnica de solución, se emplean los siguientes parámetros, que se muestran en la Tabla 5.1.

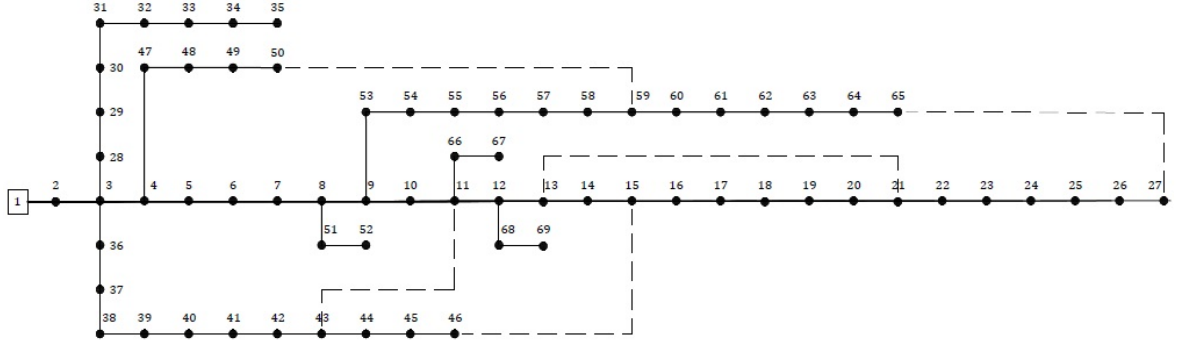


Figura 5.1: Configuración inicial - Sistema de 69 nodos

Parámetro	Valor
Número de individuos	40
Tasa de mutación	0.8
Tasa de cruce	0.9
Puntos de cruce	1
Generaciones	10000

Tabla 5.1: Parámetros del algoritmo de optimización propuesto

5.1.1. Análisis de resultados

Comparamos la solución arrojada en pérdidas, en la cual la disminución de las pérdidas de potencia activa refleja una disminución en los costos de operación. Después de implementar el ejemplo se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 5.2, en la cual se relaciona las pérdidas en potencia activa y los tramos del sistema que no tuvieron conexión.

Solución	Ramas desconectadas	Pérdidas de potencia [kW]
1 (Inicial)	[11-43], [13-21], [15-46], [50-59], [27-65]	224.92
2 (Final)	[3-4], [13-21], [15-46], [50-59], [22-33]	101.80

Tabla 5.2: Resultados - Sistema 69 nodos

La solución dos es notoriamente mejor que la uno, se puede notar en la disminución de las pérdidas de hasta un 54.739 %.

Al comparar la solución arrojada por la técnica de solución de este trabajo, con la mejor solución encontrada en la literatura (99.59 kW [22]) observamos que se encuentran en un porcentaje muy bajo 2.170 %, lo cual nos indica que este trabajo arroja un resultado muy aproximado para la disminución de pérdidas.

La Figura 5.2, nos muestra la configuración final de sistema de distribución.

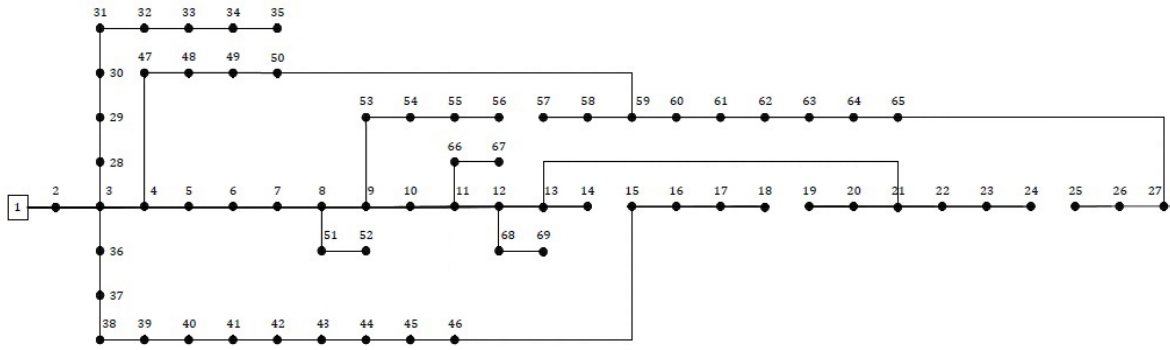


Figura 5.2: Topología final - Sistema de 69 nodos

5.2. Sistema de prueba II

Este es un sistema de 70 nodos [23], el cual se presenta en la Figura 5.3. Este sistema de distribución contiene once posibles conexiones para realizar la reconfiguración que se representan con las líneas discontinuas. El cuadrado corresponde a la subestación, mientras que los puntos son nodos.

Los parámetros del sistema se presenta en las Tabla B.1 del apéndice B, las cuales contienen la información de las líneas y cargas en los nodos, respectivamente.

Para la aplicación de la técnica de solución, se emplearán los mismos parámetros de la Tabla 5.1.

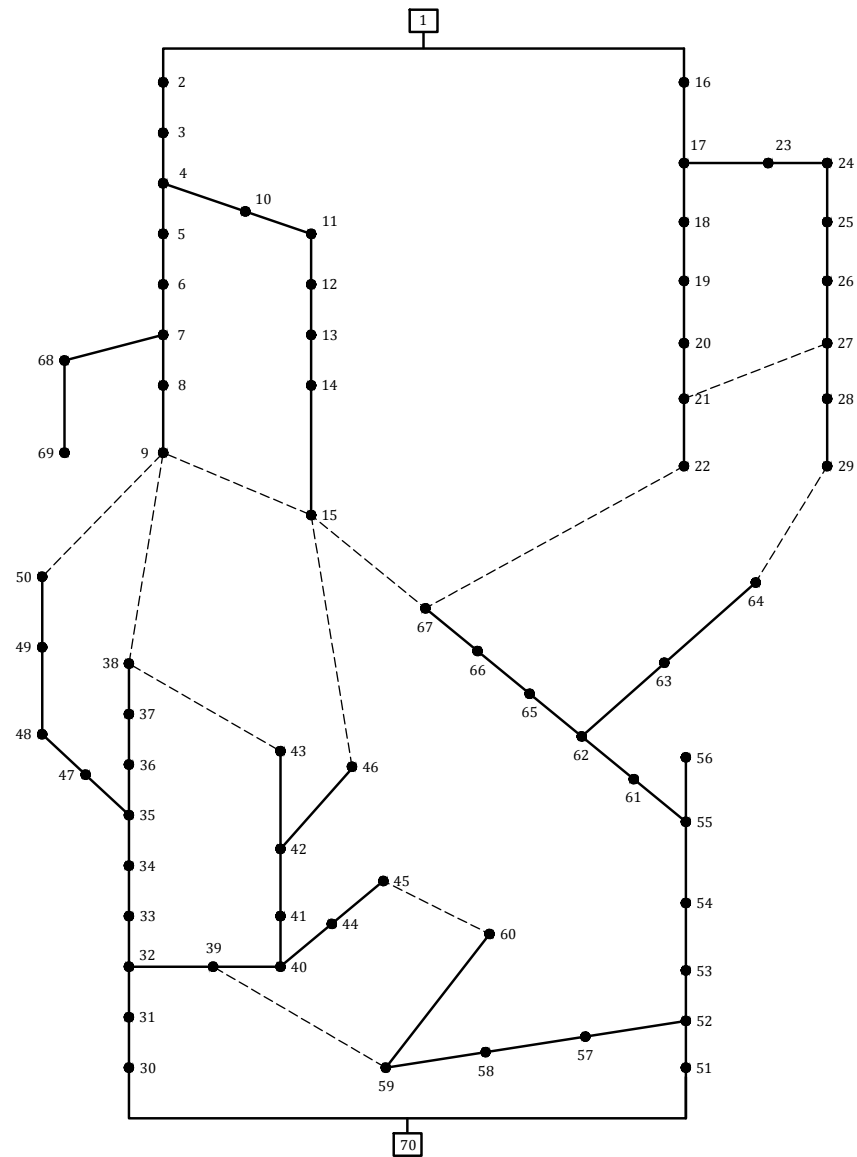


Figura 5.3: Topología inicial - Sistema de 70 nodos

5.2.1. Análisis de resultados

Hacemos la comparación a nivel de pérdidas, después de implementar el sistema de prueba se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 5.3, en la cual se relaciona las pérdidas en potencia activa y los tramos del sistema que no tuvieron conexión.

Solución	Ramas desconectadas	Pérdidas de potencia [kW]
1 (Inicial)	[9-50], [9-38], [15-46], [22-67], [29-64], [45-60], [43-38],[39-59], [21-27], [15-9], [67-15]	227,56
2 (Final)	[8-9], [14-15], [28-29], [37-38], [40-44], [49-50], [62-65],[15-46], [39-59], [21-27], [15-9]	204.77

Tabla 5.3: Resultados - Sistema 70 nodos

La solución dos es notoriamente mejor que la conexión inicial, se puede notar en la disminución de las pérdidas de hasta un 10.0149 %.

Al comparar la solución arrojada por la técnica de solución de este trabajo, con la mejor solución encontrada en la literatura (205.32 kW [23]) observamos que se reducen en un 0.2678 %, lo cual nos indica que este trabajo arroja un buen resultado para la disminución de pérdidas, demostrando su efectividad.

La Figura 5.4, nos muestra la configuración final de sistema de distribución.

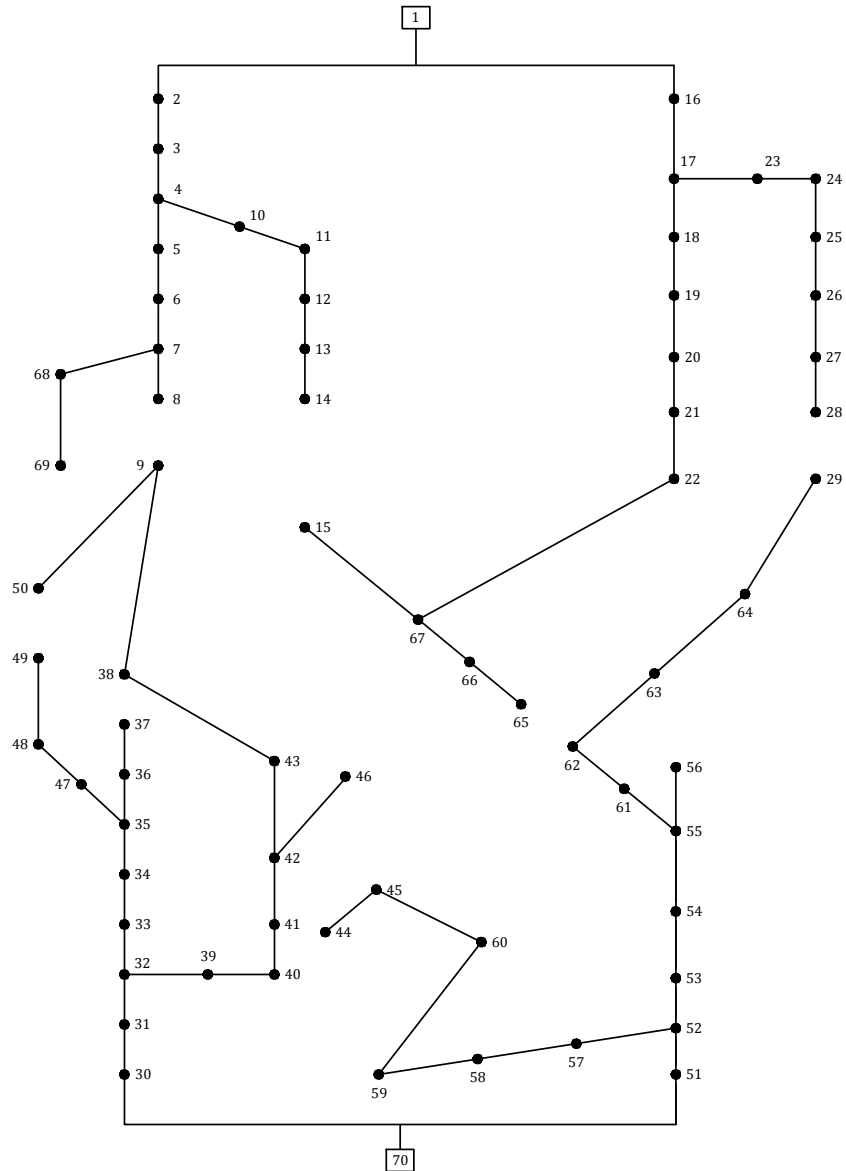


Figura 5.4: Topología final - Sistema de 70 nodos

Capítulo 6

Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

- Se desarrolló un modelo matemático para representar el problema de reconfiguración óptimo en sistemas de distribución, que considera la disminución de pérdidas como función objetivo, y se propuso un análisis de su comportamiento a través del análisis de casos similares encontrados en la literatura especializada.
- La técnica de solución propuesta mediante la hibridación de un algoritmo genético y las hormigas león, muestra que en los sistemas de prueba utilizados se encuentra una muy buena solución comparada con la reportada en la literatura especializada; sin embargo, es importante resaltar que dada la naturaleza del método, no se puede garantizar que siempre encuentre, la solución global óptima global del problema. No obstante, se pueden encontrar soluciones de muy buena calidad en tiempos de cómputo muy cortos.
- Los resultados obtenidos en los sistemas de prueba utilizados, muestran la aplicabilidad de la metodología en sistemas de distribución reales, la cual da la posibilidad a los operadores de red de: tener una opción de inversión, mayor aprovechamiento de recursos y disminución en costos de operación, lo cual es de gran interés.

6.2. Recomendaciones

- Se recomienda hacer un estudio económico, que haga una comparación costo beneficio, al relacionar el costo que implica instalar nuevas líneas en el sistema, su mantenimiento, operación. Con esto analizar utilidades y ver la viabilidad de la implementación de nuevos tramos de red, para lograr la disminución en los costos.
- Con el fin de agilizar los tiempos de cálculo en la solución del problema, es recomendable trabajar sobre un espacio de soluciones factibles, para evitar configuraciones no implementables sobre el sistema de distribución las cuales consumen tiempos importantes en términos de evaluación computacional.
- Como trabajo futuro se puede emplear la estrategia de reconfiguración aquí desarrollada para generar configuraciones de buena calidad en problemas de planeación de sistemas de distribución a largo plazo, al igual que en la selección de puntos para ubicación de elementos de corte y maniobra sobre las redes.

Apéndice A

Datos del Sistema de Prueba I

Tabla A.1: Información de las líneas y cargas del sistema de prueba I

Nodo i	Nodo j	R_{ij} [Ω]	X_{ij} [Ω]	P_i [kW]	Q_i [kVAr]
1	2	0.0005	0.0012	0	0
2	3	0.0005	0.0012	0	0
3	4	0.0015	0.0036	0	0
4	5	0.0215	0.0294	0	0
5	6	0.3660	0.1864	2.6	2.2
6	7	0.3810	0.1941	40.4	30
7	8	0.0922	0.0470	75	54
8	9	0.0493	0.0251	30	22
9	10	0.8190	0.2707	28	19
10	11	0.1872	0.0619	145	104
11	12	0.7114	0.2351	145	104
12	13	1.0300	0.3400	8	5
13	14	1.0440	0.3400	8	5
14	15	1.0580	0.3496	0	0
15	16	0.1966	0.0650	45	30
16	17	0.3744	0.1238	60	35
17	18	0.0047	0.0016	60	35
18	19	0.3276	0.1083	0	0

Continuación ...

Tabla A.1: Información de las líneas y cargas del sistema de prueba I (continuation)

Nodo i	Nodo j	R_{ij} [Ω]	X_{ij} [Ω]	P_i [kW]	Q_i [kVAr]
19	20	0.2106	0.0690	1	0.6
20	21	0.3416	0.1129	114	81
21	22	0.0140	0.0046	5	3.5
22	23	0.1591	0.0526	0	0
23	24	0.3463	0.1145	28	20
24	25	0.7488	0.2475	0	0
25	26	0.3089	0.1021	14	10
26	27	0.1732	0.0572	14	10
3	28	0.0044	0.0108	26	18.6
28	29	0.0640	0.1565	26	18.6
29	30	0.3978	0.1315	0	0
30	31	0.0702	0.0232	0	0
31	32	0.3510	0.1160	0	0
32	33	0.8390	0.2816	10	10
33	34	1.7080	0.56460	14	14
34	35	1.4740	0.4873	4	4
3	36	0.0044	0.0108	26	18.55
36	37	0.0640	0.1565	26	18.55
37	38	0.1053	0.1230	0	0
38	39	0.0304	0.0355	24	17
39	40	0.0018	0.0021	24	17
40	41	0.7283	0.8509	102	1
41	42	0.3100	0.3623	0	0
42	43	0.0410	0.0478	6	4.3
43	44	0.0092	0.0116	0	0
44	45	0.1089	0.1373	39.22	26.3
45	46	0.0009	0.0012	39.22	26.3
4	47	0.0034	0.0084	0	0
47	48	0.0851	0.2083	79	56.4
48	49	0.2898	0.7091	384.7	274.5
49	50	0.0822	0.2011	384.7	274.5

Continuación ...

Tabla A.1: Información de las líneas y cargas del sistema de prueba I (continuation)

Nodo i	Nodo j	R_{ij} [Ω]	X_{ij} [Ω]	P_i [kW]	Q_i [kVAr]
8	51	0.0928	0.0473	40.5	28.3
51	52	0.3319	0.1140	3.6	2.7
9	53	0.1740	0.0886	4.35	3.5
53	54	0.2030	0.1034	26.4	19
54	55	0.2842	0.1447	24	17.2
55	56	0.2813	0.1433	0	0
56	57	1.5900	0.5337	0	0
57	58	0.7837	0.2630	0	0
58	59	0.3042	0.1006	100	72
59	60	0.3861	0.1172	0	0
60	61	0.5075	0.2585	1244	888
61	62	0.0974	0.0496	32	23
62	63	0.1450	0.0738	0	0
63	64	0.7105	0.3619	227	162
64	65	1.0000	0.5302	59	42
65	66	0.2012	0.0611	18	13
66	67	0.0047	0.0014	18	13
67	68	0.7394	0.2444	28	20
68	69	0.0047	0.0016	28	20

Apéndice B

Datos del Sistema de Prueba II

Tabla B.1: Información de las líneas y cargas del sistema de prueba II

Nodo i	Nodo j	R_{ij} [Ω]	X_{ij} [Ω]	P_i [kW]	Q_i [kVAr]
1	2	1,097	1,074	100	90
2	3	1,463	1,432	60	40
3	4	0,731	0,716	150	30
4	5	0,366	0,358	75	50
5	6	1,828	1,79	15	9
6	7	1,097	1,074	18	14
7	8	0,731	0,716	13	10
8	9	0,731	0,716	16	11
4	10	1,08	0,734	20	10
10	11	1,62	1,101	16	9
11	12	1,08	0,734	50	40
12	13	1,35	0,917	105	90
13	14	0,81	0,55	25	15
14	15	1,944	1,321	40	25
7	68	1,08	0,734	100	60
68	69	1,62	1,101	40	30
1	16	1,097	1,074	60	30
16	17	0,366	0,358	40	25

Continuación ...

Tabla B.1: Información de las líneas y cargas del sistema de prueba II (continuation)

Nodo i	Nodo j	R_{ij} [Ω]	X_{ij} [Ω]	P_i [kW]	Q_i [kVAr]
17	18	1,463	1,432	15	9
18	19	0,914	0,895	13	7
19	20	0,804	0,787	30	20
20	21	1,133	1,11	90	50
21	22	0,475	0,465	50	30
17	23	2,214	1,505	60	40
23	24	1,62	1,11	100	80
24	25	1,08	0,734	80	65
25	26	0,54	0,367	100	60
26	27	0,54	0,367	100	55
27	28	1,08	0,734	120	70
28	29	1,08	0,734	105	70
70	30	0,366	0,358	80	50
30	31	0,731	0,716	60	40
31	32	0,731	0,716	13	8
32	33	0,804	0,787	16	9
33	34	1,17	1,145	50	30
34	35	0,768	0,752	40	28
35	36	0,731	0,716	60	40
36	37	1,097	1,074	40	30
37	38	1,463	1,432	30	25
32	39	1,08	0,734	150	100
39	40	0,54	0,367	60	3
40	41	1,08	0,734	120	70
41	42	1,836	1,248	90	60
42	43	1,296	0,881	18	10
40	44	1,188	0,807	16	10
44	45	0,54	0,367	100	50
42	46	1,08	0,734	60	40
35	47	0,54	0,367	90	75
47	48	1,08	0,734	85	55

Continuación ...

Tabla B.1: Información de las líneas y cargas del sistema de prueba II (continuation)

Nodo i	Nodo j	R_{ij} [Ω]	X_{ij} [Ω]	P_i [kW]	Q_i [kVAr]
48	49	1,08	0,734	100	70
49	50	1,08	0,734	140	90
70	51	0,366	0,378	60	40
51	52	1,463	1,432	20	11
52	53	1,463	1,432	40	30
53	54	0,914	0,895	36	24
54	55	1,097	1,074	30	20
55	56	1,097	1,074	43	30
52	57	0,27	0,183	80	50
57	58	0,27	0,183	240	120
58	59	0,81	0,55	125	110
59	60	1,296	0,881	25	10
55	61	1,188	0,807	10	5
61	62	1,188	0,807	150	130
62	63	0,81	0,55	50	30
63	64	1,62	1,101	30	20
62	65	1,08	0,734	130	120
65	66	0,54	0,367	150	130
66	67	1,08	0,734	25	15
9	50	0,908	0,726	140	90
9	38	0,381	0,244	30	25
15	46	0,681	0,544	60	40
22	67	0,254	0,203	25	15
29	64	0,254	0,203	30	20
45	60	0,254	0,203	25	10
43	38	0,454	0,363	30	25
39	59	0,454	0,363	125	110
21	27	0,454	0,363	100	55
15	9	0,681	0,544	16	11
67	15	0,454	0,363	40	25

Bibliografía

- [1] S. R. Castaño, *Redes de distribución de energía*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia, 2009, tercera edición. [Online]. Available: <http://www.bdigital.unal.edu.co/3393/>
- [2] S. Carvajal, J. Lopez, and C. Lemoine, “Reconfiguración de sistemas de distribución de energía eléctrica usando un algoritmo de optimización basado en colonia de hormigas,” *Revista Tecnura*, vol. 12, no. 24, pp. 14–22, 2009.
- [3] A. Coelho, A. B. Rodrigues, and M. G. D. Silva, “Distribution network reconfiguration with reliability constraints,” in *2004 International Conference on Power System Technology, 2004. PowerCon 2004.*, vol. 2, Nov 2004, pp. 1600–1606 Vol.2.
- [4] A. M. G. Cabezas, H. P. Schmidt, N. Kagan, M. R. Gouvea, and P. A. Martin, “Reconfiguration of distribution systems using the newton method in quadratic formulations,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 6, no. 2, pp. 162–169, June 2008.
- [5] E. Emary, H. M. Zawbaa, and A. E. Hassanien, “Binary ant lion approaches for feature selection,” *Neurocomputing*, vol. 213, pp. 54 – 65, 2016, binary Representation Learning in Computer Vision. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925231216307263>
- [6] S. Mirjalili, “The ant lion optimizer,” *Adv. Eng. Software*, vol. 83, pp. 80 – 98, 2015. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965997815000113>
- [7] M. J. Hadidian-Moghaddam, S. Arabi-Nowdeh, M. Bigdeli, and D. Azizian, “A multi-objective optimal sizing and siting of distributed generation using ant lion optimization technique,” *Ain Shams Engineering Journal*, 2017. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447917300357>
- [8] H. M. Dubey, M. Pandit, and B. Panigrahi, “Ant lion optimization for short-term wind integrated hydrothermal power generation scheduling,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 83, pp. 158 – 174, 2016. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061516305853>
- [9] T. Thakur and Jaswanti, “Study and characterization of power distribution network reconfiguration,” in *2006 IEEE/PES Transmission Distribution Conference and Exposition: Latin America*, Aug 2006, pp. 1–6.
- [10] A. Cárcamo-Gallardo, L. García Santander, and J. E. Pezoa, “Reconfiguración de redes eléctricas de media tensión basada en el algoritmo de prim,” *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*,

- vol. 15, pp. 83 – 91, 04 2007. [Online]. Available: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052007000100011&nrm=iso
- [11] P. Zhang and W. Li, “Reliability-oriented distribution network reconfiguration,” in *2010 Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, Jan 2010, pp. 1–6.
 - [12] N. Rugthaicharoencheep and S. Sirisumrannukul, “Feeder reconfiguration for loss reduction in three phase distribution system under unbalanced loading conditions,” in *45th International Universities Power Engineering Conference UPEC2010*, Aug 2010, pp. 1–6.
 - [13] S. Jazebi and B. Vahidi, “Reconfiguration of distribution networks to mitigate utilities power quality disturbances,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 91, pp. 9 – 17, 2012. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779612001083>
 - [14] A. Bayat, “Uniform voltage distribution based constructive algorithm for optimal reconfiguration of electric distribution networks,” *Electric Power Systems Research*, vol. 104, pp. 146 – 155, 2013. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779613001600>
 - [15] Y. LakshmiReddy, T. Sathiyarayanan, and D. Sydulu, “Application of firefly algorithm for radial distribution network reconfiguration using different loads,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 47, no. 1, pp. 700 – 705, 2014, 3rd International Conference on Advances in Control and Optimization of Dynamical Systems (2014). [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016327318>
 - [16] S. Naveen, K. S. Kumar, and K. Rajalakshmi, “Distribution system reconfiguration for loss minimization using modified bacterial foraging optimization algorithm,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 69, pp. 90 – 97, 2015. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061515000150>
 - [17] Y. Ch, S. Goswami, and D. Chatterjee, “Effect of network reconfiguration on power quality of distribution system,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 83, no. Supplement C, pp. 87 – 95, 2016. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061516305713>
 - [18] M. Lavorato, J. F. Franco, M. J. Rider, and R. Romero, “Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, no. 1, pp. 172–180, Feb 2012.
 - [19] J. Holland, *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. University of Michigan Press, 1975. [Online]. Available: <https://books.google.com.co/books?id=JE5RAAAAMAAJ>
 - [20] J. P. Gallego, O. D. Montoya, R. A. Hincapié, and M. Granada, “Optimal location of reclosers and fuses in distribution systems,” *ITECKNE*, vol. 13, no. 2, pp. 113–126, dec 2016.
 - [21] O. D. Montoya, A. Grajales, R. A. Hincapié, M. Granada, and R. A. Gallego, “Methodology for optimal distribution system planning considering automatic reclosers to improve reliability indices,” in *2014 IEEE PES Transmission Distribution Conference and Exposition - Latin America (PES T D-LA)*, Sept 2014, pp. 1–6.

- [22] J. S. Savier and D. Das, “Impact of network reconfiguration on loss allocation of radial distribution systems,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 4, pp. 2473–2480, Oct 2007.
- [23] D. Das, “Reconfiguration of distribution system using fuzzy multi-objective approach,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 28, no. 5, pp. 331 – 338, 2006.
[Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061506000184>